中国生态农业学报 2016 年 3 月 第 24 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2016, 24(3): 265−273

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151006

大麦/豌豆间作系统种间竞争力及产量对地下作用和密度互作的响应*

王利立[1,2] 朱永永[3] 殷 文[1,2] 郑德阳[1,2] 柴 强[1,2**]

(1. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070;
3. 甘肃省农业技术推广总站 兰州 730070)

摘 要 种间关系是间作高产和资源高效利用的重要生物学基础，揭示种间关系对间作产量的影响，对优化间作技术具有重要理论指导意义。本研究通过盆栽试验，设计根系完全分隔(地上互作)与不分隔(地上地下互作)2 种种间作用关系，及 2 个大麦种植密度(15 株·盆$^{-1}$、25 株·盆$^{-1}$)，探讨了根系相互作用与密植对大麦间作豌豆种间竞争互补关系及产量的影响，以期为建立基于优化种间关系提高间作产量的管理技术提供理论依据。结果表明：1)与单作相比，间作可提高群体干物质积累量 3.6%~11.3%，其中地下作用的贡献率为 53.9%~63.5%；增加大麦种植密度，使根系不分隔间作处理的群体干物质量提高 12.5%~14.4%，根系完全分隔间作处理提高 3.3%~6.7%。同样，与单作相比，间作群体籽粒产量提高 8.6%~38.8%，地下作用的贡献率为 2.4%~16.2%；增加大麦种植密度，不分隔与分隔间作处理的籽粒产量分别提高 7.0%~10.9%与 1.2%~2.6%，说明地下根系相互作用是间作密植的重要基础。2)间作可提高大麦、豌豆的收获指数，大麦提高 8.7%~21.0%、豌豆提高 3.3%~31.7%；间作大麦收获指数随着大麦种植密度的增加而增大，而间作豌豆收获指数随着大麦种植密度的增加而降低，根系完全分隔处理降低作用更明显。3)根系不分隔地下作用可提高间作群体土地当量比(LER)，增加大麦种植密度降低了 LER，说明地下根系相互作用是产生间作优势的主要原因。4)地下作用明显增大了大麦相对于豌豆全生育期的平均竞争力，增长率达 40.1%~89.1%；增加大麦种植密度，平均竞争力提高 11.0%~49.9%。5)间作群体籽粒产量与大麦相对于豌豆全生育期的平均竞争力呈二次相关关系，当该竞争力在 0.35、0.13 时利于间作大麦、豌豆获得高产。本研究表明，通过增加大麦种植密度(如本研究的 25 株·盆$^{-1}$)来适度提高大麦的竞争优势，特别是大麦灌浆期的竞争优势有利于间作群体整体产量的提高。

关键词 大麦/豌豆间作 隔根 地下作用 作物产量 土地当量比 竞争力
中图分类号: S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)03-0265-09

Competitiveness and yield response to belowground interaction and density in barley-pea intercropping system*

WANG Lili[1,2], ZHU Yongyong[3], YIN Wen[1,2], ZHENG Deyang[1,2], CHAI Qiang[1,2**]

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Agro-technology Extension Station, Lanzhou 730070, China)

Abstract Interspecific relationship is an important biological basis for high-yield and efficient utilization of resources in intercropping systems. It can reveal the effects of interspecific relationships on the yield of intercropping systems, providing

* 国家自然科学基金项目(31160265, 31360323)和甘肃农业大学“伏羲杰出人才培育计划”资助
** 通讯作者：柴强，主要从事多熟种植、节水农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
王利立，主要从事多熟种植研究。E-mail: wll@gsau.edu.cn
收稿日期: 2015−09−14 接受日期: 2015−12−08
* This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31160265, No. 31360323), and the Outstanding Talent Culture Project of Gansu Agriculture University.
** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
Accepted Sep. 14, 2015; accepted Dec. 8, 2015

the theoretical and guiding basis for optimizing intercropping agriculture. To this end, a pot experiment was set up to investigate the effects of root interaction and planting density on grain yield, interspecific competition and complementarity of barley-pea intercropping system. In the experiment, two kinds of species interactions were set, only aboveground interaction (whole root partition of two intercropped crops) and aboveground and belowground interaction (without root partition between two intercropped crops), in combination with two planting densities of barley (15 plants·pot^{-1} and 20 plants·pot^{-1}). The study was designed to provide the theoretical basis for raising yield management technique under intercropping based on interspecific relationship optimization. The study showed that: 1) compared with the corresponding monoculture system, average dry matter accumulation of intercropping systems increased by 3.6%–11.3%. The contribution rate of belowground interaction was 53.9%–63.5%. For the intercropping system with belowground and aboveground interactions, increased planting density of barley enhanced dry matter accumulation of the system by 12.5%–14.4%. But, for the intercropping system only with aboveground interaction, it increased by 3.3%–6.7%. Similarly, barley-pea intercropping total grain yield was 8.6%–33.8% higher than the average grain yield of the corresponding monocultures. The contribution rate of the existing belowground interaction was 2.4%–16.2%. With increasing planting density of barley, the intercropping system existing both belowground and aboveground interactions increased total grain yield by 7.0%–10.9%; while the intercropping system existing only aboveground interaction only increased by 1.2%–2.6%. This suggested that belowground interaction was critical for close planting in intercropping systems. 2) Compared with corresponding monoculture treatments, intercropping increased harvest indexes (i.e., HI) of barley and pea by 8.7%–21.0% and 3.3%–31.7%, respectively. The harvest index of intercropped barley increased with increasing planting density of barley while that of intercropped pea decreased. The trend of the decline was more obvious under whole root partition. 3) Belowground interaction without root partition increased land equivalent ratio (LER), but high planting density of barley decreased LER in barley-pea intercropping system. This suggested that belowground root interaction was the main force behind the advantages of intercropping. 4) The belowground interaction significantly increased the competitiveness (by up to 40.1%–89.1%) of barley to pea during the period of co-growth. The average competitiveness increased by 11.0%–49.9% with increasing barley planting density. 5) A quadratic relationship existed between total grain yield of barley-pea intercropping system and the average competitiveness of barley to pea during the whole period of co-growth. High grain yields of both crops were obtained when competitiveness was 0.13–0.33. Our results showed that appropriately improving the competitiveness of barley and pea intercropping system (especially at barley grain-filling stage) by increasing the planting density of barley (25 plant·pot^{-1}) increased total grain yield of the intercropping system.

Keywords Barley/pea intercropping; Root interaction; Belowground interaction of crops; Corp yield; Land equivalent ratio; Competitiveness

间作高效利用资源及其产量优势已被大量研究所证实[1−2]，而作物种间竞争与互补是产生间作优势的重要决定因素[3−4]，历来是多熟种植研究的重点领域。两种作物共生期内，间作为资源需求特性不同的作物提供了从时间和空间利用生态位分异的基础[5]，促成了种间互补对相关资源的高效利用[6]，并且在短生育期作物收获后，可形成时间和空间上的补偿效应，使作物在间作共生期内由竞争造成的早期生长抑制得以恢复，使得总体上表现为增产优势[7−8]，说明通过种间关系的合理利用，可以达到间作作物共同增产增效目的。生态学研究进一步表明，在一定条件下，间作作物地下根系的相互影响及养分、水分在土壤中的移动比地上部相互影响更为重要，生态位分离是间作优势产生的主要生态机制[9−10]。另外，间作中由于两种作物所占据的地上部和地下部生态位发生了分离，在时间生态位上前后分离和在空间生态位上互补扩大，实现对光、热、水及养分等资源最大限度的利用，从而产生间作优势[10−11]。同时，密植是间作高产的重要措施之一，但有关不同密度条件下间作种间关系与生产力的研究十分薄弱，开展密度与间作作物种间关系的系统研究，对进一步挖掘密植效应至关重要。另有研究表明，根系分隔法可用于区分间作群体地上部分与地下部分对产量的贡献大小，是确定配对作物间的竞争与互补作用的有效方法[12−14]。纵观有关复合群体增产的种间关系研究，仍缺乏通过配对作物种间竞争力的调控而提高间作群体生产力的理论依据。众所周知，不同类型的间作模式中，禾豆间作因豆科作物能固氮、增加生物多样性、提高资源利用率而备受关注，并被认为是未来可持续农业发展的重要方向之一[15−16]，在大麦(*Hordeum vulgare* Linn.)/豌豆(*Pisum sativum* Linn.)间作体系中，存在种间氮营养互补利用机制，大麦通过竞争吸收土壤中的氮，减少土壤氮素对固氮酶活性的抑制，促进豌豆对空气中氮的固定[17]。为此，本研究以典型的大麦/豌豆间作体系为对象，在根系完全分隔(地上互作)和不隔根(地上地下互作)

条件下，量化大麦种植密度对作物种间竞争力的影响，揭示根间相互作用对密植影响种间竞争力的调控效应，以期为通过间作作物竞争力的调控而提高复合群体增产效应提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2012—2013 年 3—7 月在甘肃农业大学日光温室进行。供试土壤为黏壤土，取自秦王川下家井，有机质 12.9 $g\cdot kg^{-1}$，铵态氮 2.9 $mg\cdot kg^{-1}$，硝态氮 5.0 $mg\cdot kg^{-1}$，土壤全磷 0.4 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷 0.1 $g\cdot kg^{-1}$。施用的磷肥为 KH_2PO_4，施用量为 0.1 $g(P_2O_5)\cdot kg^{-1}$(土)；所有处理均不施氮肥。

供试大麦品种'甘啤 4 号'(*Hordeum vulgare* L. cv. Ganpi 4)，豌豆品种'陇豌 1 号'(*Pisum sativum* L. cv. Longwan 1)。

1.2　试验设计

本试验为盆栽试验，供试陶瓷盆直径 30 cm，高 45 cm，每盆装土 14 kg。设单作豌豆、单作大麦、大麦间作豌豆 3 种种植模式。间作设根系不分隔和根系用塑料布(厚度 0.025 mm)完全分隔 2 种处理方式，两种作物各占栽培面积的一半(盆中装土前，将花盆用木板隔成大小相同的左右 2 个区域，一个区域中放入 0.025 mm 厚度的塑料布，塑料布的大小保证铺满整个区域；在 2 个区域中同时装土，随着装土量的上升抽动木板，至 7 kg 土分别全部装入 2 个区域后抽出木板；塑料布的上边沿高出土壤表面，以便区分 2 个区域；将大麦和豌豆分别均匀播种在 2 个区域中)；大麦密度设 2 个梯度，共组成 7 个处理(表 1)，每处理重复 3 次，全生育期取样 4 次，每处理共种植 12 盆。

2012 年度，大麦 3 月 31 日播种，7 月 14 日收获，豌豆 4 月 1 日播种，7 月 2 日收获；2013 年度，大麦 3 月 31 日播种，豌豆 4 月 1 日播种，两种作物均于 6 月 24 日收获。

表 1　试验设计及处理代码

Table 1　Experiment design and treatment codes

处理 Treatment	种植模式 Cropping pattern	隔根方式 Root partition pattern	密度 Density ($plant\cdot pot^{-1}$)	
			大麦 Barley	豌豆 Pea
B_1	单作大麦 Monocultured barley	—	30	—
B_2		—	50	—
P	单作豌豆 Monocultured pea	—	—	30
I_1	大麦/豌豆间作 Barley-pea intercropping	不隔根(地上地下作用) No root partition with above- and below-ground interaction between two crops	15	15
I_2			25	15
RI_1	大麦/豌豆间作 Barley-pea intercropping	完全隔根(地上作用) Whole root partition only with above-ground interaction between two crops	15	15
RI_2			25	15

1.3　测定指标与计算方法

1.3.1　地上干物重

豌豆出苗 20 d 开始测定，共取样 4 次，其中前 3 次每次间隔 20 d，分别处于大麦的分蘖期、抽穗期和灌浆期，第 4 次取样为成熟期(具体时间以作物成熟收获为准)。全盆采样，每处理每次采样 3 盆，样品于 105 ℃下杀青，80 ℃恒温烘干，按盆计算地上部干物质重。

1.3.2　产量

作物成熟时，籽粒产量和生物产量均按盆收获，并计算其收获指数。

$$\text{收获指数}=\text{籽粒产量}/\text{生物产量} \tag{1}$$

1.3.3　种间关系

$$\text{土地当量比(LER)}:\quad LER=\frac{Y_{ib}}{Y_{sb}}+\frac{Y_{ip}}{Y_{sp}} \tag{2}$$

式中：Y_{ib} 和 Y_{ip} 分别表示间作大麦、豌豆的产量，Y_{sb} 和 Y_{sp} 表示单作大麦、豌豆的产量。当 LER>1 时，表明具有间作优势；LER<1 时，表明间作为劣势[18]。

$$\text{种间相对竞争能力}(A_{bp}):\quad A_{bp}=\frac{Y_{ib}}{Y_{sb}\times Z_b}-\frac{Y_{ip}}{Y_{sp}\times Z_p} \tag{3}$$

式中：A_{bp} 为大麦相对于豌豆的竞争力，其他指标含义同 LER。当 $A_{bp}>0$ 时，大麦竞争能力强于豌豆；当 $A_{bp}<0$ 时，大麦竞争能力弱于豌豆[19]。Z_b 和 Z_p 分别为间作系统中大麦和豌豆所占比例，本试验中 $Z_b=Z_p=0.5$。

1.3.4　贡献率

地下作用贡献率(RCT):

$$RCT=\frac{Y_I-Y_{RI}}{Y_{RI}} \tag{4}$$

式中：Y_I 为根系不分隔作物的干物质或产量，Y_{RI} 为隔

根下作物的干物质或产量。

密度贡献率(RCT_D):

$$RCT_D = \frac{Y_{D2} - Y_{D1}}{Y_{D1}} \tag{5}$$

式中: Y_{D2}为相同种间关系高密度下的干物质或产量, Y_{D1}为相同种间关系低密度下的干物质或产量。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据整理, 利用 SPSS 17.0 软件进行相关数据的统计与相关分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理下间作大麦、豌豆的干物质累积特征

2012 年与 2013 年度, 不同处理的干物质累积动态如图 1。在各生育时期, 相同占地面积下均表现为间作大麦、豌豆的干物质积累量高于相应单作; 相同的种间作用下, 高密度的间作大麦干物质积累量高于低密度; 相同种植密度下, 不隔根处理间作大麦及豌豆的干物质积累量高于隔根处理。

在大麦分蘖期至成熟期, 与相应单作的平均干物质积累量相比, 间作平均高 3.6%~11.3%, 地下作用的贡献为 53.9%~63.5%。间作模式中, 增加密度提高了间作群体的干物质积累量, 增幅达 7.9%~10.5%, 说明密植效应是提高间作群体干物质积累量的途径之一。特别地, 间作模式中, 增加大麦种植密度, 不隔根间作群体干物质量平均提高 12.5%~14.4%, 根系完全分隔平均提高 3.3%~6.7%, 说明不隔根有利于增强密度增大的正效应。

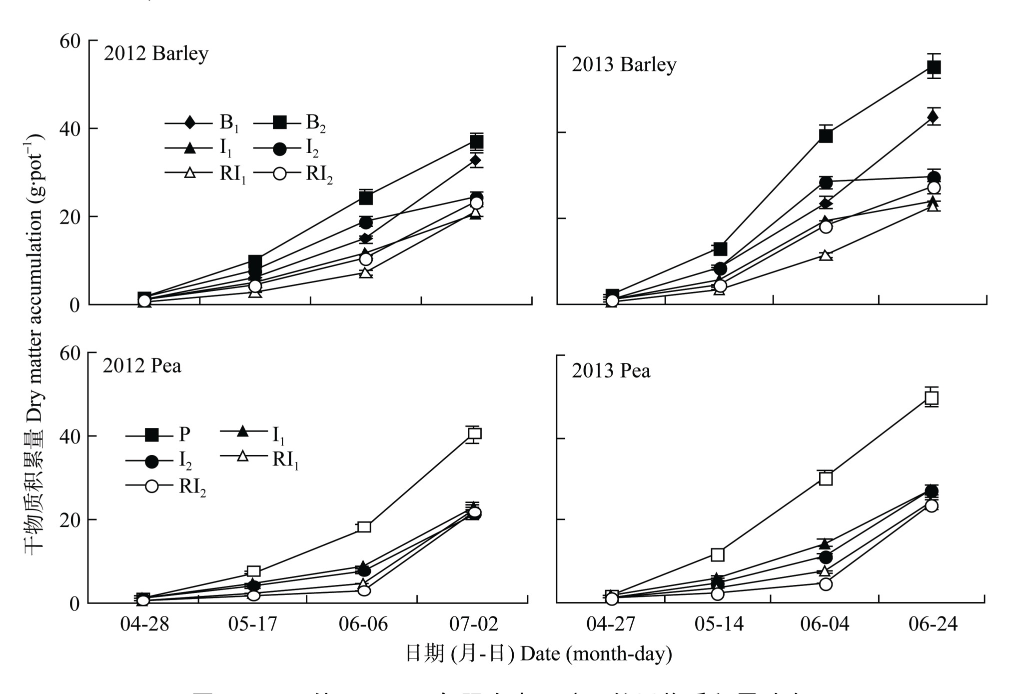


图 1　不同处理下不同年限大麦、豌豆的干物质积累动态

Fig. 1　Dynamic accumulations of both barley and pea dry matter under different treatments in different years

2.2　不同处理下大麦间作豌豆的籽粒产量、收获指数

密度与种间相互作用显著影响间作大麦、豌豆的产量、收获指数(表 2)。2012 年度与 2013 年度, 除隔根高密度间作之外, 与相应单作籽粒产量的平均相比, 间作群体籽粒产量高 8.6%~38.8%, 地下作用的贡献率为 2.4%~16.2%, 其中增加大麦种植密度, 不隔根间作群体籽粒产量提高 7.0%~10.9%、根系完全分隔提高 1.2%~2.6%, 说明不隔根是增强密度正效应的有效途径。

在相同占地面积下, 间作大麦的籽粒产量较相应单作大麦高 10.0%~57.6%, 间作豌豆的籽粒产量分别高 2.9%~42.9%, 说明间作可提高大麦、豌豆的籽粒产量。相同间作组分作物相比, 不分隔间作大麦的籽粒产量较仅存地上部互作高 1.1%~16.7%; 增加大麦种植密度, 间作大麦的籽粒产量提高 9.7%~26.6%。地上地下相互作物下间作豌豆的籽粒产量较地上部互作下高 3.9%~20.8%, 与高密度大麦间作豌豆的籽粒产量较低密度降低 7.5%~20.0%, 说明间作模式中增大竞争优势种的密度可提高优势种的籽粒产量, 但降低劣势种的籽粒产量。

密度与地下作用均显著提高了间作大麦、豌豆的收获指数(HI)。间作大麦 HI 分别比单作提高 8.7%~21.0%; 不隔根地上地下互作下间作大麦 HI

表 2　不同处理不同年限的大麦、豌豆产量及收获指数

Table 2　Yields and harvest indexes of barley and pea under different treatments in different years

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield ($g\cdot pot^{-1}$)			生物产量 Biological yield ($g\cdot pot^{-1}$)			收获指数 Harvest index	
		大麦 Barley	豌豆 Pea	混合产量 Mixed yield	大麦 Barley	豌豆 Pea	混合产量 Mixed yield	大麦 Barley	豌豆 Pea
2012	B_1	17.3±1.9b	—	17.3±1.58d	43.7±10.47b	—	43.7±2.61d	0.397f	—
	B_2	22.9±2.51a	—	22.9±1.61a	55.6±9.93a	—	55.6±4.16a	0.412e	—
	P	—	14.0±1.86a	14.0±1.47e	—	49.8±10.49a	49.8±2.48b	—	0.281c
	I_1	11.5±1.25de	10.0±0.89b	21.5±1.89ab	24.2±4.01de	27.0±2.47b	51.2±3.52b	0.475b	0.369a
	I_2	14.3±1.76c	8.7±1.03c	23.0±1.64a	29.0±3.73c	27.3±2.61b	56.3±4.63a	0.494a	0.317b
	RI_1	10.3±1.48e	9.0±0.92c	19.3±1.43c	22.8±3.02e	24.4±2.35c	47.2±2.35c	0.450d	0.369a
	RI_2	12.6±1.42d	7.2±1.05d	19.8±1.74bc	27.3±3.49cd	23.7±2.16c	51.0±3.39b	0.461c	0.303b
2013	B_1	12.7±1.88b	—	12.7±1.94d	32.6±4.32b	—	32.6±2.03d	0.388e	—
	B_2	15.1±2.06a	—	15.1±1.50c	37.0±4.17a	—	37.0±2.27c	0.408d	—
	P	—	12.7±1.94a	12.7±1.89d	—	40.3±9.42 a	40.3±2.63b	—	0.315b
	I_1	9.4±0.70d	8.0±0.93b	17.4±1.61b	20.6±1.99d	22.7±1.18b	43.3±2.85ab	0.456b	0.351a
	I_2	11.9±1.42b	7.4±0.47cd	19.3±1.79a	24.1±3.64c	21.1±1.28c	45.2±3.22a	0.496a	0.349a
	RI_1	9.3±0.67d	7.7±0.52bc	17.0±1.46b	21.0±1.87d	22.2±1.14bc	43.2±2.81ab	0.445c	0.344ab
	RI_2	10.2±0.74c	7.0±0.43d	17.2±1.53b	23.0±1.93c	21.5±1.04c	44.5±2.94a	0.445c	0.326b

比仅存地上互作高 3.1%~11.3%；增加大麦种植密度，间作大麦 HI 提高 2.2%~8.2%。而间作豌豆的 HI 较单作高 3.3%~31.7%，高大麦种植密度下不隔根地上地下互作下间作豌豆 HI 比仅存地上互作高 4.9%~7.7%；增加大麦种植密度，隔根条件下间作豌豆 HI 降低 5.4%~17.9%。说明间作模式中增大竞争优势种的密度可提高优势种的 HI，但降低劣势种 HI，根系分隔降低作用更明显。

2.3　不同处理下大麦/豌豆间作系统的种间作用

2.3.1　不同间作处理的土地当量比

不同间作处理在两种作物根系不分隔条件下土地当量比(LER)均大于 1，而在两种作物根系完全分隔仅有地上部互作条件下，大麦抽穗及灌浆期 LER 均小于 1。间作大麦豌豆在不同种间作用下，根系不分隔条件下及低密度(I1)的 LER 最大，较不分隔高密度(I2)高 11.1%~11.6%，比根系完全分隔在低、高密度下分别高 40.0%~50.4%(PI1)和 72.4%~84.0%(PI2)，达到显著水平，说明地下作用及适宜种植密度有利于提高土地利用率。

由图 2 可得，大麦间作豌豆体系中，根系不分隔间作共处期内均表现为强烈的互补作用，并且增加大麦密度降低互补作用。根系完全分隔条件下在大麦分蘖、成熟期两种作物的互补作用最强，同样增加大麦种植密度降低互补作用。

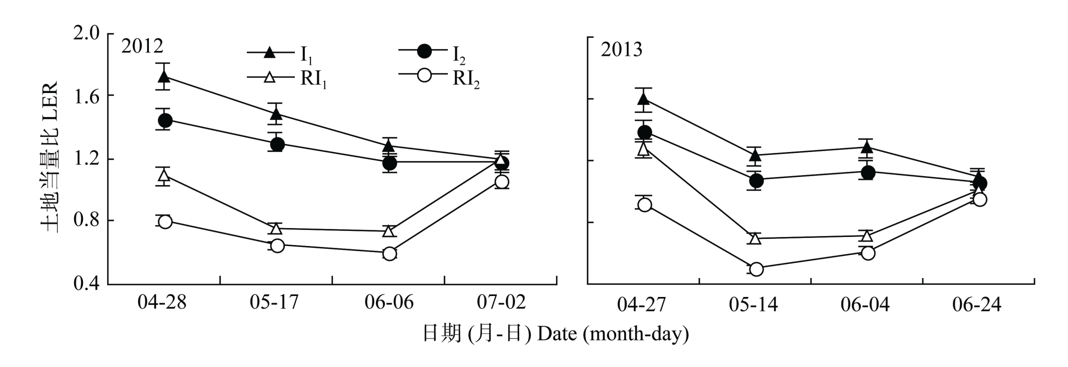


图 2　不同年限各处理不同生育期的大麦/豌豆间作体系的土地当量比动态

Fig. 2　Dynamics of land equivalent ratio (LER) of barley/pea intercropping system at different growth periods in 2012 and 2013 under different treatments

2.3.2　大麦相对于豌豆的种间竞争力动态

2012 年度与 2013 年度，大麦、豌豆共生初期竞争力极小，随生育进程的推进大麦相对豌豆的竞争力明显增大，至大麦开花—灌浆期，竞争优势达最大值，此后急剧下降，呈单峰型变化趋势(图 3)。根系不分隔较根系完全分隔处理大麦相对豌豆平均竞争力

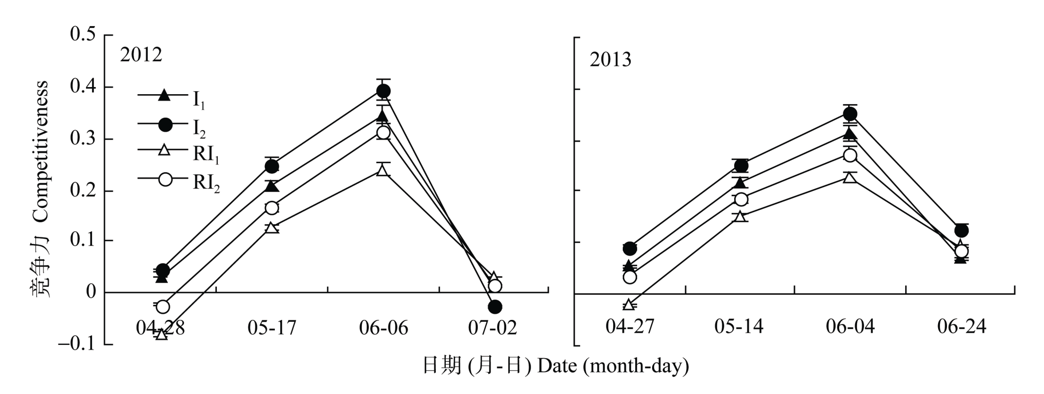


图 3 不同年限不同隔根方式下大麦/豌豆间作体系中大麦相对于豌豆的竞争力动态

Fig. 3 Dynamic changes of competitiveness of barley to pea of barley/pea intercropping system under different treatments in 2012 and 2013

全生育期高 40.1%~89.1%；同样增加大麦种植密度，大麦相对豌豆全生育期平均竞争力提高 11.0%~ 49.9%。特别是大麦抽穗期与灌浆期，根系不分隔显著增大了大麦相对于豌豆的竞争力，抽穗期高 35.3%~66.0%，灌浆期高 25.6%~44.3%。

2.4 竞争力与间作群体籽粒产量间的相关性

大麦对豌豆全生育期内的平均竞争力与间作群体籽粒产量均呈二次相关关系，具有显著相关性(图 4)。当平均竞争力分别在 0~0.35 与 0~0.13 时，随大麦对豌豆竞争力的增大，间作大麦和豌豆籽粒产量呈持续增大趋势；当平均竞争力高于 0.35、0.13 时，间作大麦、豌豆籽粒产量随之下降，说明间作群体中保持适宜大小的竞争力有利于间作作物产量的提高。因此，在大麦/豌豆间作群体的管理中，保持适宜大小的竞争力是获取较高产量的可行途径之一。

4 个测定时间大麦对豌豆的竞争力与间作大麦、豌豆籽粒产量的相关性表明，大麦间作豌豆生育前期的种间竞争力与生育后期的种间竞争力呈正相关性，并且大麦生长盛期(灌浆期)的竞争力与间作大麦籽粒产量呈显著正相关关系(表 3)。说明适度调控两种作物共生期大麦的竞争力可提高间作产量，且大麦灌浆期可作为通过间作作物种间竞争力调控而获取高产的关键管理时期。

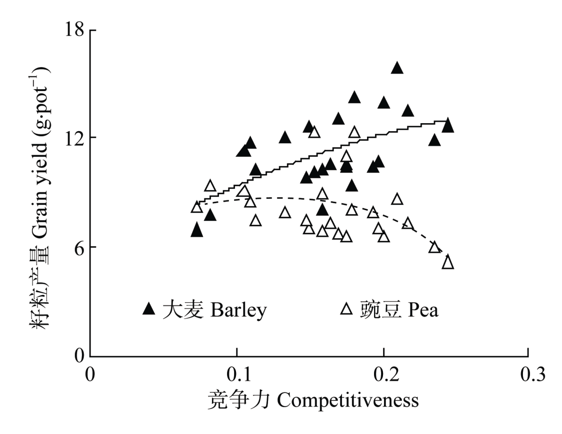


图 4 大麦/豌豆间作体系中大麦对豌豆全生育期的平均竞争力与间作大麦、豌豆籽粒产量间的相关性

Fig. 4 Correlation between competitiveness of barley to pea during whole growth period and grain yield of barley and pea in barley/pea intercropping system

表 3 大麦/豌豆间作体系中大麦豌豆共生期不同生育时期竞争力与籽粒产量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among competitiveness of barley to pea at different growth periods and grain yield of barley and pea in barley/pea intercropping system

	生育时期 Growth stage			籽粒产量 Grain yield	
	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	大麦 Barley	豌豆 Pea
分蘖期 Tillering stage	0.816**	0.659**	0.362	0.146	−0.152
抽穗期 Heading stage	1.000	0.821**	0.591**	0.354	0.126
灌浆期 Filling stage		1.000	0.439	0.566**	0.132
成熟期 Maturity stage			1.000	0.606**	−0.144

3 讨论

3.1 间作产量对地上、地下互作作用的响应

间作高产、高效及提高水分、养分、光热等资源利用率的作用已被大量研究证实[1−2]。研究表明，地下部根系相互作用和根际过程对间作优势贡献较大，根系空间分布和形态差异对作物养分和水分吸收起着决定作用，种间互作扩大作物间根系空间生态位，扩展水分和养分吸收的生态位，增加作物吸收养分的有效空间[20]。根系分隔改变了间作作物根

系形态，降低了土壤中的水肥交流和根系在空间上的叠加补偿效应，从而降低了间作优势[21–22]，但有关密植与根系相互作用对间作作物种间关系的研究鲜见报道，因此，本试验通过根系相互作用和密植对大麦间作豌豆种间竞争互补关系及产量的影响进行研究。大麦/豌豆间作体系中，间作群体籽粒产量较单作平均高 8.6%~38.8%，地下作用的贡献率为 2.4%~16.2%，且地下根系相互作用利于增强密度增大的正效应，说明密植是间作获取高产的重要措施之一；强化地下作物根系相互作用是间作增产的重要途径，这一结论也被许多学者所证实[23–24]。根系分隔比不隔根对间作大麦组分产量影响效应更为显著，而对豌豆组分产量影响差异不明显，说明大麦/豌豆间作系统中间作产量优势归因于大麦根系在空间上的重叠和水分、养分在根际间的交流，并且在大麦高种植密度下作用更明显，因此可通过种植模式、灌溉方式、施肥、密度等措施调控复合群体根系空间布局和形态，充分利用根际间的补偿效应来提高地下根系相互作用的贡献，最大化发挥间作群体增产、增益的作用。

3.2　不同种间作用与间作优势的关系

间作作物因共同利用空间和各种资源而发生竞争，但也由于间作组成作物对群体微环境的改变，使资源的可利用性增加而产生互补。竞争和互补关系同时存在，两者的相对大小及其重要性随作物的生长发育进程而改变[25–26]。在作物的整个生育期内，当总的竞争关系大于互补关系时，群体对资源的利用能力下降，表现为间作劣势；反之，群体对资源的利用增加，表现为间作优势，达到系统稳定性[27–28]。本研究中，大麦/豌豆间作复合群体在大麦、豌豆共处期内，豌豆对资源的竞争处于劣势，生长速率较低，存在地下互作的间作复合群体均表现间作优势；而在根系分隔仅有地上部互作的间作群体，在大麦抽穗期和灌浆期复合群体表现间作劣势，主要原因在于两种作物物候学特性的差异，及资源需求规律空间和时间上的差异。另外禾本科作物大麦具有极强的竞争能力，生长旺盛并对豌豆造成遮阴，也是形成间作竞争差异的主要原因[29–30]。此外，根系相互作用条件下大麦的根系和豌豆的根系可以共同生长，两者在同一空间占据着不同的生态位，虽然增加密度会增大种间竞争，但总体表现为促进作用强于竞争[31]；也说明地下根系相互作用是平衡间作两种作物种间竞争与互补关系的有效途径。存在地下互作的间作复合群体较仅存地上部互作明显增大了大麦相对于豌豆全生育期平均竞争力；同样，随着强竞争优势种大麦种植密度的增加，其竞争优势更强，尤其是大麦旺盛生长期，抽穗期与灌浆期，效应更为显著。这一结论已被前人研究所证实[30,32]，因此，采用适宜的品种搭配和种植方式可以使间作作物在生长资源的需求上具有互补性，种间的互利作用大于竞争，提高资源利用效率，从而提高间作群体产量。

3.3　种间竞争力与复合群体籽粒产量间的相关关系

间作组分作物种间竞争力与复合群体籽粒产量呈二次相关关系已被小麦间作玉米[25–26]与大麦间作豌豆[30–31]研究所证实。同样，本研究表明，间作大麦、豌豆的籽粒产量与生育期内的大麦相对于豌豆平均竞争力均呈二次曲线相关关系，且在一定竞争力范围内(大麦 0~0.35，豌豆为 0~0.13)随大麦竞争优势的加大，间作大麦、豌豆的籽粒产量呈提高趋势。在资源供给限制型生长条件下，对资源需求具有一定相似性且播种时间差异不大的大麦、豌豆在间作群体中的竞争力差异较小，而在空间和水肥资源方面获得补偿的机会相对较大，也为通过适度增大大麦的相对竞争力而提高复合群体的生产力提供了保障，因此在大麦豌豆间作群体的管理中通过适当增加大麦的相对竞争力是获取较高产量的可行途径之一，大麦灌浆期可作为通过间作配对作物竞争力调控而提高复合群体产量的关键生育时期，这与前人的研究结果[25]相一致。

本研究中，地下根系相互作用是提高间作群体产量、密植是适当增加大麦竞争优势的重要突破点。通过增加大麦种植密度来调控种间竞争力，是间作获得高产的有效途径。发展禾豆间作模式可提高间作群体的生产力，因此进一步详细量化不同隔根方式下不同组分作物在空间与时间生态位上的竞争与互补应作为间作复合群体研究的重要方向之一。

4　结论

本研究中，地上地下相互作用及低密度隔根间作较单作籽粒产量高 8.6%~38.8%，根系不分隔提高间作群体的籽粒产量，其贡献率为 2.4%~16.2%；间作群体籽粒产量随大麦种植密度的增加而增大，根系不分隔与根系完全分隔条件下密度的贡献率分别为 7.0%~10.9%与 1.2%~2.6%，说明地下作用有利于增强密度增加的正效应。根系不分隔显著增大了大麦相对于豌豆全生育期平均竞争力，贡献率为 40.1%~89.1%；增加大麦种植密度，平均竞争力提高 11.0%~49.9%。间作大麦、豌豆籽粒产量与大麦相对

于豌豆全生育期的平均竞争力均呈二次相关关系，当该竞争力在0.35时利于间作大麦高产，在0.13时利于间作豌豆高产，并且大麦灌浆期是调控种间竞争力提高间作产量的关键生育时期。总之，通过增加大麦种植密度来调控种间竞争力，是间作获得高产的有效途径，通过种间根系完全作用可增强密度增加正效应和间作优势。

参考文献 References

[1] Mu Y P, Chai Q, Yu A Z, et al. Performance of wheat/maize intercropping is a function of belowground interspecies interactions[J]. Crop Science, 2013, 53(5): 2186–2194

[2] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(2): 257–263

[3] Dapaah H K, Asafu-Agyei J N, Ennin S A, et al. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops[J]. The Journal of Agriculture Science, 2003, 140(1): 73–82

[4] Ndakidemi P A. Manipulating legume/cereal mixtures to optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems[J]. African Journal of Biotechnology, 2006, 5(25): 2526–2533

[5] Firbank L G, Watkinson A R. On the effects of competition: From monocultures to mixtures[M]//Grace J B, Tilman D. Perspectives on Plant Competition. San Diego, CA: Academic Press, 1990: 165–192

[6] Takim F O. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. Journal of Agriculture Biodiversity Research, 2012, 1(4): 53–59

[7] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3): 173–181

[8] Tsay J S, Fukai S, Wilson G L. Effects of relative sowing time of soybean on growth and yield of cassava in cassava/soybean intercropping[J]. Field Crops Research, 1988, 19(3): 227–239

[9] 刘广才, 李隆, 黄高宝, 等. 大麦/玉米间作优势及地上部和地下部因素的相对贡献研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1787–1795
Liu G C, Li L, Huang G B, et al. Intercropping advantage and contribution of above-ground and below-ground interactions in the barley-maize intercropping[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(9): 1787–1795

[10] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1): 305–312

[11] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 477–484
Liu G C, Yang Q F, Li L, et al. Intercropping advantage and contribution of above- and below-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 477–484

[12] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965–973
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and faba bean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965–973

[13] 罗照霞, 柴强. 不同供水水平下间甲酚和间作对小麦、蚕豆耗水特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1478–1482
Luo Z X, Chai Q. Effect of 3-methyl phenol at different rates of irrigation and intercropping on water consumption, and yield of wheat and faba-bean[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1478–1482

[14] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123–137

[15] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 豆科/禾本科间作系统中氮营养研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(6): 44–49
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. An outlook of the complementary nitrogen nutrition in the legume//graminaceae system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(6): 44–49

[16] 李玉英, 余常兵, 孙建好, 等. 蚕豆玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 223–227
Li Y Y, Yu C B, Sun J H, et al. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 223–227

[17] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(3): 289–300

[18] Willey R W. Intercropping its importance and research needs: Ⅰ. Competition and yield advantage[J]. Field Crops Abstract, 1979, 32: 1–10

[19] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 249–256

[20] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1617–1630
Li Y Y, Hu H S, Cheng X, et al. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below-growth in faba bean/maize intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1617–1630

[21] 郝艳如, 劳秀荣, 赵秉强, 等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(1): 71–74
Hao Y R, Lao X R, Zhao B Q, et al. Effect of separating root method on wheat and corn intercropping system[J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(1): 71–74

[22] 张向前，黄国勤，卞新民，等．施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响[J]．土壤学报，2012, 49(4): 731–739
Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, et al. Effects of nitrogen fertilization and root separation on agronomic traits of intercropping soybean, quantity of micro organisms and activity of enzymes in soybean rhizosphere[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 731–739
[23] Corre-Hellou G, Brisson N, Launay M, et al. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies[J]. Field Crops Research, 2007, 103(1): 76–85
[24] Neumann A, Werner J, Rauber R. Evaluation of yield-density relationships and optimization of intercrop compositions of field-grown pea-oat intercrops using the replacement series and the response surface design[J]. Field Crops Research, 2009, 114(2): 286–294
[25] 齐万海，柴强．不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]．中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31–34
Qi W H, Chai Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. China Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 31–34
[26] 殷文，赵财，于爱忠，等．秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]．作物学报，2015, 41(4): 633–641
Yin W, Zhao C, Yu A Z, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(4): 633–641
[27] Vandermeer J H. Intercropping[M]//Carrol C R, Vandermeer J H, Rosset P M. Agroecology. New York: McGraw-Hill, 1990: 481–516
[28] Ofori F, Stern W R. Cereal-legume intercropping systems[J]. Advances in Agronomy, 1987, 41: 41–90
[29] Willey R W. Intercropping — Its importance and research needs. Part Ⅱ. Agronomy and research approaches[J]. Field Crops Abstract, 1979, 32(2): 73–85
[30] 张妍，王利立，柴强，等．施氮水平对大麦间作豌豆种间竞争的调控效应[J]．农业现代化研究, 2014, 35(3): 381–384
Zhang Y, Wang L L, Chai Q, et al. Effects of nitrogen fertilization on inter-competitiveness in a barley-pea intercropping system[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(3): 381–384
[31] 叶优良，肖焱波，黄玉芳，等．小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对水分利用的影响[J]．中国农学通报，2008，24(3): 445–449
Ye Y L, Xiao Y B, Huang Y F, et al. Effect of wheat/maize and faba bean/maize intercropping on water use[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(3): 445–449
[32] 秦亚洲，王利立，柴强，等．大麦间作豌豆的种间竞争力及产量对施氮量的响应[J]．农业现代化研究，2015，36(3): 482–487
Qin Y Z, Wang L L, Chai Q, et al. Responses of interspecific competition and crop yield to nitrogen applications in a barley-field pea intercropping system[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(3): 482–487